

# HIL 测试系统中的虚拟 ECU 建模技术与自动化测试框架实现

方正<sup>1</sup> 余东海<sup>1</sup> 刘飞翔<sup>2</sup> 张盼<sup>2</sup> 张永光<sup>1</sup>

1.杭州迪为科技有限公司 310000; 2.宁波普瑞均胜汽车电子有限公司 315000

**【摘要】**为解决发动机ECU硬件测试周期长、成本高、极端工况复现难的问题，企业聚焦HIL测试系统核心技术，开展虚拟ECU建模与自动化测试框架研究。通过剖析发动机ECU核心功能模块，构建兼顾精度与实时性的虚拟建模方案，明确虚拟ECU与实体ECU的硬件信号及总线交互逻辑，规避电气故障建模歧义。基于dSPACE平台搭建自动化测试框架，整合FPGA板卡实现转速、氧传感器等特殊信号的采集与仿真，优化测试流程以支撑发动机ECU全生命周期验证。

**【关键词】**HIL测试；虚拟ECU；发动机ECU；建模技术；自动化测试框架

Research on Virtual ECU Modeling Technology and Automated Testing Framework Implementation in HIL Testing System

Fang Zheng<sup>1</sup> Yu Donghai<sup>1</sup> Liu Feixiang<sup>2</sup> Zhang Pan<sup>2</sup> Zhang Yongguang<sup>1</sup>

1. Hangzhou Diwei Technology Co., Ltd. 310000; 2. Ningbo Prui Junsheng Automotive Electronics Co., Ltd. 315000

**【Abstract】**To address the challenges of prolonged testing cycles, high costs, and difficulty in replicating extreme operating conditions for engine ECU hardware, enterprises have focused on core technologies of HIL testing systems by conducting research on virtual ECU modeling and automated testing frameworks. Through analyzing core functional modules of engine ECU, a virtual modeling solution was developed that balances precision and real-time performance. This approach clarifies the hardware signal and bus interaction logic between virtual and physical ECU, thereby avoiding ambiguities in electrical fault modeling. An automated testing framework was established based on the dSPACE platform, integrating FPGA boards to achieve acquisition and simulation of special signals such as rotational speed and oxygen sensors. The testing process was optimized to support full lifecycle verification of engine ECU.

**【Key words】**HIL testing; virtual ECU; engine ECU; modeling technology; automated testing framework

随着汽车发动机电控技术的迭代升级，ECU 作为发动机控制核心，其功能复杂度与可靠性要求持续提升<sup>[1]</sup>。企业在发动机 ECU 研发过程中，传统实体测试模式受限于硬件成本、测试场景覆盖不足、极端工况模拟困难等问题，导致测试周期延长、研发投入增加，难以满足快速迭代的产品研发需求。HIL 测试系统通过实时仿真技术，将实体 ECU 接入仿真环境，实现实验室场景下的闭环验证，是突破传统测试瓶颈的关键技术<sup>[2]</sup>。虚拟 ECU 建模作为 HIL 测试的核心环节，其建模精度与实时性直接决定测试有效性，而自动化测试框架则是提升测试效率、降低人为干预的核心支撑。当前企业在虚拟 ECU 建模中仍面临电气故障建模不规范、特殊信号仿真不足等问题，自动化测试框架的兼容性与扩展性也有待优化。因此，开展发动机 ECU 针对性的虚拟建模技术研究，构建适配 dSPACE 平台的自动化测试框架，对企业提升发动机 ECU 研发测试水平、缩短产品上市周期具有重要

现实意义。

## 1、HIL 测试系统与虚拟 ECU 核心关联解析

### 1.1 HIL 测试系统的核心构成与测试逻辑

HIL 测试系统的核心价值的是在实验室环境中构建与真实发动机运行等效的闭环测试场景，核心逻辑是将实体 ECU 作为测试对象，通过实时仿真模型替代发动机本体、传感器及执行器等被控对象，实现实体 ECU 的功能验证与故障模拟。与 SIL 测试仅依托软件算法与仿真模型完成闭环仿真不同，HIL 测试的核心特征是接入实体 ECU 硬件，通过硬件接口与仿真模型实现信号交互，既保留实体 ECU 的硬件特性，又能通过仿真模型灵活复现各类测试工况。企业搭建的发动机 ECU HIL 测试系统，核心构成包括实体 ECU、实时仿真平台、信号交互模块、故障注入模块及测试控制模

块。其中实时仿真平台选用 dSPACE 系统,信号交互模块需整合 FPGA 板卡,以满足发动机转速、氧传感器、喷油点火信号等特殊信号的高速采集与仿真需求,是保障测试准确性的基础。

### 1.2 虚拟 ECU 的核心定位与建模前提

虚拟 ECU 并非替代实体 ECU,而是 HIL 测试系统中辅助实体 ECU 测试、优化测试流程的重要组成部分,其核心定位是在特定测试场景下,模拟实体 ECU 的核心功能与信号交互逻辑,支撑测试场景扩展与测试效率提升。企业开展虚拟 ECU 建模的核心前提,是明确虚拟 ECU 与实体 ECU、HIL 测试系统的交互边界<sup>[1]</sup>。二者既通过总线实现数据交互,更需通过硬件接口完成电气信号的传输,确保虚拟 ECU 与实体 ECU 的信号输出特性一致,为后续实体 ECU 与虚拟 ECU 的灵活切换提供支撑。虚拟 ECU 建模需严格贴合发动机 ECU 的实际硬件架构与控制逻辑,重点覆盖燃油喷射控制、点火控制、怠速控制等核心功能模块,同时兼顾电气故障建模的规范性,明确短路、断路等电气故障在虚拟 ECU 中的仿真逻辑,避免建模歧义。

## 2、发动机 ECU 虚拟建模技术研究

### 2.1 虚拟 ECU 建模的核心原则与技术难点

企业开展发动机 ECU 虚拟建模,需遵循三大核心原则:一是功能等效性,虚拟 ECU 需完整复现实体 ECU 的核心控制逻辑,确保在相同输入信号下的输出响应与实体 ECU 一致;二是实时性,虚拟 ECU 的仿真速度需匹配 HIL 测试系统的实时性要求,尤其是发动机转速、喷油点火等高频信号的仿真,需控制延迟在毫秒级以内;三是可扩展性,虚拟建模需预留接口,支持后续发动机 ECU 功能迭代后的模型更新与故障场景扩展。当前企业虚拟 ECU 建模面临的核心技术难点,主要集中在三个方面:一是发动机复杂工况下的动态特性建模精度不足,难以精准复现高负荷、急加速等极端工况下的 ECU 控制响应;二是特殊信号的仿真难度大,转速信号、氧传感器信号等非标准电气信号的采集与仿真需依托 FPGA 板卡实现,模型与硬件的协同难度较高;三是电气故障建模不规范,短路、断路等电气故障的仿真逻辑与实体故障的一致性难以保障,易导致测试结果偏差。

### 2.2 发动机 ECU 核心功能模块建模实现

虚拟 ECU 建模以发动机 ECU 的硬件架构与控制算法为核心,按功能模块拆分建模,再通过接口整合实现完整虚拟模型的构建,企业在建模过程中重点聚焦四大核心模块。燃油喷射控制模块建模,需基于发动机转速、进气压力、水温

等关键参数,复现实体 ECU 的喷油脉宽计算逻辑,考虑燃油雾化、喷油正时等影响因素,通过数学模型拟合喷油流量与控制信号的关联关系,确保虚拟模型的喷油控制精度。点火控制模块建模,需结合发动机转速与负荷,模拟实体 ECU 的点火提前角控制策略,兼顾点火能量、点火时机的动态调整逻辑,解决高转速工况下点火控制的实时性问题。怠速控制模块建模,重点模拟实体 ECU 对节气门开度的调节逻辑,结合发动机怠速转速反馈,构建闭环控制模型,复现怠速稳定控制与负载变化后的调节响应。传感器信号处理模块建模,需整合发动机各类传感器的信号特性,模拟信号滤波、放大、AD 转换等处理过程,同时预留故障注入接口,支持传感器断路、短路等电气故障的仿真,为后续故障测试提供支撑。

## 3、发动机 ECU HIL 自动化测试框架实现

### 3.1 自动化测试框架的设计思路与核心目标

企业创建发动机 ECU HIL 自动化测试框架,主要思路依靠 dSPACE 实时仿真平台,把虚拟 ECU 模型、实体 ECU、信号交互模块和测试管理模块整合起来。从而达成测试用例自动执行、测试数据自动采集、测试结果自动分析的全流程自动化,削减人为干预,加强测试效率和测试一致性。框架设计包含常规功能测试、故障注入测试、极端工况测试等场景,具有良好的兼容性与扩展性,以支持不同型号发动机 ECU 的测试适配,支持测试用例、虚拟模型的快速更新,保证测试的实时性、准确性。且依靠 dSPACE 平台的实时运算能力、FPGA 板卡的高速信号处理能力,保证测试过程中信号交互的实时性,提高测试数据的准确性。

### 3.2 自动化测试框架的整体架构搭建

发动机 ECU HIL 自动化测试框架基于分层架构设计,自上而下分为测试管理层、测试执行层、信号交互层与仿真模型层,各层相互协同,实现全流程自动化测试。测试管理层作为框架的核心管控单元,负责测试用例的管理、测试任务的调度、测试数据的存储与分析,企业通过该层实现测试流程的可视化管控,支持测试用例的批量导入、编辑与执行,同时自动生成测试报告,为测试结果分析提供支撑。测试执行层依托 dSPACE 平台的测试脚本开发功能,实现测试用例的自动执行,包括虚拟 ECU 与实体 ECU 的切换控制、故障注入的自动触发、测试工况的自动切换等,脚本开发采用 dSPACE 专用开发工具,确保与平台的兼容性,避免采用 Flask 等非专业 HIL 测试框架导致的实时性不足问题。信号交互层由 FPGA 板卡与信号调理模块组成,负责发动机 ECU

与仿真模型之间的信号传输与转换,重点处理转速、氧传感器、喷油点火等特殊信号,实现信号的高速采集、滤波与输出,保障信号交互的准确性与实时性。

### 3.3 测试用例设计与自动化执行流程优化

测试用例设计是自动化测试框架落地的核心,企业结合发动机 ECU 的核心功能与测试需求,按测试类型拆分设计测试用例,覆盖常规功能测试与故障注入测试两大类。常规功能测试用例重点围绕燃油喷射控制、点火控制、怠速控制等核心功能,设计不同工况下的测试场景,例如不同转速、不同负荷下的喷油脉宽测试,怠速稳定性测试,急加速、急减速工况下的控制响应测试等,每个测试用例明确输入参数、预期输出结果与测试判定标准。故障注入测试用例则针对各类电气故障,设计故障触发条件、故障持续时间与测试判定指标,例如传感器断路故障下的 ECU 故障诊断响应测试,执行器短路故障下的发动机运行状态控制测试等。在自动化执行流程优化方面,企业通过脚本编程实现测试用例的批量执行,优化测试场景切换逻辑,减少场景切换过程中的信号干扰与延迟。

## 4、虚拟 ECU 建模与自动化测试框架的应用适配要点

### 4.1 建模精度与实时性的平衡策略

虚拟 ECU 建模过程中,精度与实时性的平衡是企业面临的核心问题——过高的建模精度会增加模型的运算复杂度,导致仿真实时性下降,无法满足 HIL 测试的实时性要求;过低的建模精度则会导致测试结果偏差,失去虚拟建模的意义。企业采取的平衡策略的是分层建模,核心功能模块(如喷油点火控制)采用高精度数学模型,细化控制逻辑与动态响应特性,确保功能等效性;非核心模块(如辅助信号处理)采用简化模型,降低运算复杂度,提升仿真实时性。同时,通过 dSPACE 平台的模型优化工具,对虚拟模型进行降阶处理,去除冗余运算逻辑,优化模型的运算效率,确保虚拟 ECU 的仿真速度匹配 HIL 测试系统的实时性要求,实

现精度与实时性的协同平衡。

### 4.2 实体 ECU 与虚拟 ECU 的切换适配保障

实体 ECU 和虚拟 ECU 灵活切换,是提高 HIL 测试效率、扩大测试场景的重要手段。在硬件接口上用标准化接口设计,虚拟 ECU 和实体 ECU 使用同一个信号交互模块,保证切换过程中信号接口兼容性,无需重新连接硬件。在信号同步上用时间同步机制保证虚拟 ECU 和实体 ECU 的信号输出时序一致,防止切换过程中出现信号断层或者延迟。且在测试场景上建立统一的测试场景配置文件,虚拟 ECU 和实体 ECU 可共用一套测试用例和测试参数,保证切换后测试场景的连续性。

### 4.3 测试框架的运维与迭代优化

自动化测试框架长期稳定运行需要完善的运维机制和持续的迭代优化,企业建立了全流程运维管理体系,保证框架的可用性和适配性。日常运维时定期对框架的硬件设备(dSPACE 平台、FPGA 板卡、信号调理模块)进行检测和维护,排除设备故障及信号干扰问题,保证硬件设备正常工作。为保证测试流程顺畅可控,可定期备份测试数据、测试用例,防止数据丢失,对测试脚本进行优化,修复脚本运行过程中出现的漏洞,提高脚本的稳定性。迭代优化时按照发动机 ECU 研发迭代的要求,不断更新虚拟 ECU 模型以及测试用例,加入新的测试场景和故障种类,对测试过程中出现的框架缺陷进行优化,改善信号交互逻辑和测试执行流程,提高框架的测试效率和准确性。

## 5、结论

虚拟 ECU 建模技术以及自动化测试框架的创建,是企业冲破发动机 ECU 传统测试的瓶颈,改善研发测试水平的重要途径。本文针对发动机 ECU 展开 HIL 测试系统虚拟 ECU 建模技术研究,确定建模原则和难点,进一步提高建模精度与实时适配能力。

## 参考文献

- [1]刘同涛.C-V2X 虚拟仿真硬件在环测试方法及系统实现[D].吉林大学,2024.
- [2]马雪滢.应用于旋转导向工具硬件在环测试的虚拟电机研究[D].西安石油大学,2023.
- [3]钟义祥.面向功能安全的 eBooster 硬件在环测试系统研发[D].天津理工大学,2022.

作者简介:方正,出生年月:1986.04.24,男,汉族,籍贯:浙江省杭州市,学历:研究生,职称:中级工程师,研究方向:汽车电子软件开发及仿真测试技术。